

УДК 621.923

## **ВЛИЯНИЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИПУСКА КЕРАМИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

**Гусев В.В.**

*(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

Эксплуатационные показатели деталей, наряду с условиями работы (давления на сопрягаемых поверхностях, скорости их относительного перемещения, вида трения и смазки и т.д.) и параметрами, характеризующими состав, структуру и механические свойства взаимодействующих поверхностей, определяются параметрами, характеризующими состояние поверхностного слоя деталей. Для оценки качества поверхностного слоя используют: геометрические параметры (отклонения от заданной геометрической формы, параметры волнистости, характеристики шероховатости, направление следов обработки). Из геометрических параметров детали наиболее изучено влияние на ее эксплуатационные показатели шероховатости поверхности, которая является простым и надежным критерием оценки состояния технологического процесса механической обработки и условий эксплуатации. Рекомендуемыми параметрами рабочих поверхностей деталей машин являются средне арифметическое отклонение профиля шероховатости  $R_a$ , высота сглаживания профиля с высоты наибольшего выступа  $R_p$ , средний шаг неровностей профиля  $S_m$ , относительная опорная длина профиля  $t_r$  и наибольшая высота профиля  $R_{max}$  [1]. Величина износа детали за период приработки зависит от того, насколько исходная шероховатость отличается от оптимальной, и может достигать 20-30% от предельного значения ее износа. Значение интенсивности изнашивания зависит от исходной шероховатости, от того, насколько она отличается от равновесной. Поэтому для деталей, работающих в стационарных условиях, важным является уменьшение и сокращение их приработки. Таким образом, необходимо технологически обеспечить оптимальную структуру поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей пары трения. Применение математических моделей для расчета параметров микрорельефа поверхностного слоя позволяет без проведения длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований выбрать рациональные с точки зрения эксплуатации характеристики алмазного круга и режимы обработки изделий из конструкционной керамики (КК).

Случайный характер рельефа круга является доминирующим в формировании шероховатости поверхностного слоя детали при шлифовании. Для описания микрорельефа поверхностного слоя детали принято использовать аппарат теории вероятностей и случайных процессов [2]. Это связано с участием в процессе резания множества режущих кромок с неопределенной геометрической формой и различной разновысотности на рабочей поверхности круга, а также разнообразной формой среза, оставляемого после обработки алмазным зерном. Единичный поперечный срез, полученный в результате силового взаимодействия алмазного зерна и поверхностного слоя керамики, будет отличаться от идеальной формы, которая имела бы место при полном копировании формы зерна [3, 4]. Характерным результатом разрушения являются боковые сколы и вырыв групп зерен из поверхностного слоя заготовки в виде очагов разрушения, которые оказывают наибольшее влияние на формирование шероховатости поверхностного слоя. Влияние хрупкого разрушения на форму единичного среза не поддается точному аналитическому прогнозированию. Степень влияния хрупкого разрушения

припуска на процесс формирования микрорельефа поверхностного слоя с учетом вероятностного характера вырыва группы зерен керамики до настоящего времени глубоко не изучена.

Целью настоящей работы является разработка математической модели формирования микрорельефа поверхности конструкционной керамики при алмазном шлифовании. При разработке математической модели необходимо учесть случайный характер хрупкого разрушения в виде очагов разрушения.

Математическая модель формирования микрорельефа поверхности КК была разработана применительно к схеме плоского шлифования периферией круга. Процесс пластического оттеснения керамики при резании алмазным зерном в модели можно не учитывать, так как он играет значительную роль лишь при сверхвысоких скоростях резания и при шлифовании с очень малыми глубинами резания. При обработке керамики наряду с внутрикristаллической деформацией протекает и межкristаллическая деформация – относительное скольжение и поворот зерен, дробление их на отдельные блоки, разрушение по границам зерен и их блоков. Примем, что формирование поверхностного слоя на керамической заготовке происходит в результате удаления материала припуска при копировании формы алмазного зерна круга и скола группы зерен керамики в виде очага разрушения.

Независимо от вида керамики на обработанной поверхности наблюдается поле очагов разрушения в виде сколов, возникающее в результате случайного процесса разрушения припуска алмазными зёрнами (рис. 1). Для этого поля сколов характерно явление ординарности, так как они появляются по одиночке, а не по два, три, и т.д. Вероятность попадания того или иного числа сколов в плоскую фигуру не зависит от того, сколько сколов попало в любую другую непересекающуюся с ней фигуру. Таким образом, выполняется условие отсутствия взаимодействия сколов.

Проверка однородности поля сколов осуществлялась на основе анализа статистических распределений, полученных из фотографий различных участков поверхности

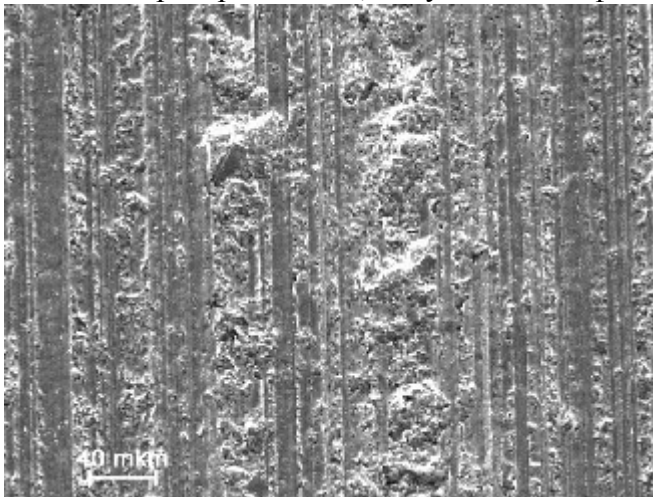


Рис. 1. Поверхность керамического образца ( $Al_2O_3$ ) после алмазного шлифования. Плоское шлифование периферией круга 1A1 250x20x32 AC6 125/100 – 4 – M2-01

образцов. Гипотеза однородности поля сколов подтверждается с доверительной вероятностью 0,1. Среднее число сколов  $\lambda_c$ , попадающих на единицу площади, характеризует интенсивность процесса сколов при диспергировании припуска. Интенсивность сколов  $\lambda_c(t)$  на поверхности различной КК при неизменной глубине резания  $t$  определялась экспериментально

$$\lambda_c(t) = S_c / S, \quad (1)$$

где  $S_c$  – площадь сколов на поверхности керамического образца площадью  $S$ .

Исходя из сказанного, поле сколов может быть описано распределением Пуассона. Вероятность появления числа сколов  $m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) на базовой поверхности определяется по зависимости

$$P_m(c) = \frac{a_c^m}{m!} e^{-a_c}, \quad (2)$$

где  $a_c = \lambda_c \cdot S_{\sigma}$  - параметр Пуассона ( $S_{\sigma}$  - площадь базовой поверхности). Поверхностная плотность образуемых сколов зависит от глубины резания и физико-механических свойств обрабатываемого материала (рис.2). С увеличением индекса хрупкости ( $H_V/K_{1c}$ ) обрабатываемого материала, количество дефектов на единице поверхности уменьшается.

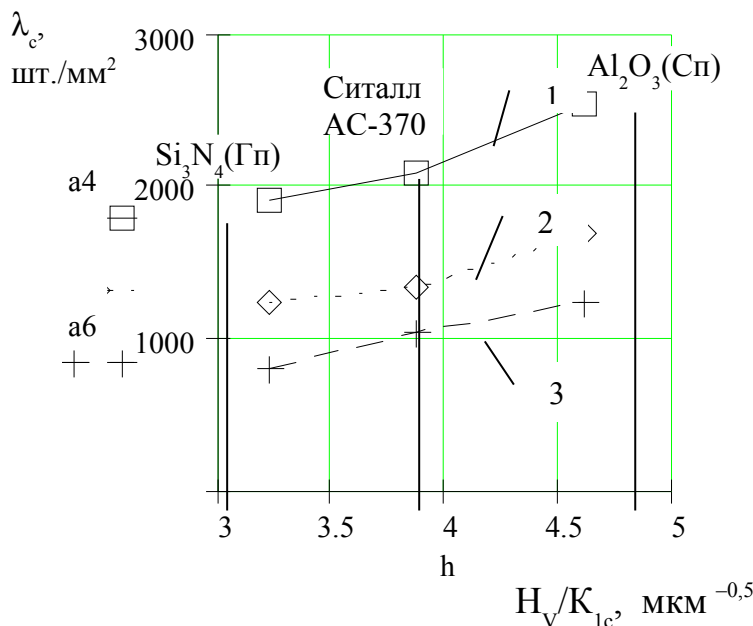


Рис. 2. Влияние индекса хрупкости ( $H_V/K_{1c}$ ) материала на поверхностную плотность сколов  $\lambda_c$  при плоском врезном шлифовании алмазным кругом 1А1 200х20х32 АС6 125/100 – 4 - М2-01, скорость детали 0,5 м/мин, скорость круга 42 м/с, фактическая глубина резания: 1 –  $t=0,01$  мм; 2 –  $t=0,08$  мм; 3 –  $t=0,15$  мм. Твердость обрабатываемых материалов в зоне резания уменьшается, то индекс хрупкости материала уменьшается. Это приводит к увеличению доли пластических деформаций при разрушении материала припуска и снижению интенсивности сколов на поверхности заготовки.

При переходе от числа сколов на поверхности (1) к их числу на базовой длине в математической модели, на которой определяются параметры микрорельефа поверхностного слоя, использовали основное положение стереологии [7]:

$$S_A = L_L = P_P, \quad (3)$$

где  $S_A$  – доля площади сколов на единице площади поверхности,  $L_L$  – длина линейных отрезков пробной линии, пересекающей сколы, приходящихся на единицу длины этой линии,  $P_P$  – число точек, попадающих на сколы, отнесенных к общему числу пробных точек.

При хрупком разрушении в виде скола профиль канавки, оставленной зерном, не имеет сходства с профилем зерна, и параметры канавки превышают теоретическую ширину и глубину резания зерном. Разрушение керамики в виде очагов шириной  $b_c$  является случайным процессом, зависящим от режимов резания. При фиксированном значении режимов резания математическое ожидание ширины скола  $m_b$  равно математиче-

ся. Это объясняется тем, что материалы с большим индексом хрупкости имеют меньшую предельную глубину микрорезания, при которой происходит переход от вязкого к хрупкому разрушению [5]. При одной и той же глубине внедрения зерна и низком индексе хрупкости доминирует пластический механизм разрушения материала припуска, а с ростом индекса хрупкости материала происходит переход к хрупкому разрушению керамики [2]. С увеличением фактической глубины резания при шлифовании температура на поверхности заготовки увеличивается [6]. Так как с ростом температуры

скому ожиданию случайного процесса сколов материала припуска зерном. Для фиксированных режимов резания распределение ширины сколов подчиняется нормальному закону с параметрами  $m_b$ ,  $\sigma$ . Так как силы резания на одном зерне зависят от сечения среза материала на нем, то можно предположить, что и средняя ширина скола будет зависеть от площади сечения среза зерном. Средние и максимальные сечения среза могут быть посчитаны в соответствии с методикой, приведенной в работе [8] для любого положения зерна в зоне резания. Обработка экспериментальных результатов, приведенных в работе [3], показала наличие линейной корреляционной связи между средней шириной скола  $m_b$  оксидной керамики и средними сечениями среза  $f_3$

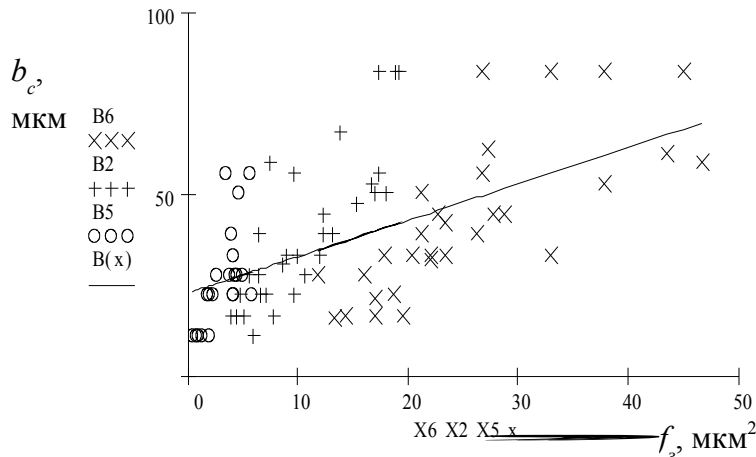


Рис.3. Влияние среднего сечения среза на зернах  $f_3$  (мкм<sup>2</sup>) на ширину скола  $b_c$  (мкм)  $Al_2O_3(Sp)$ : о –  $V = 0,5 \text{ м/мин}$ ; + –  $V = 2 \text{ м/мин}$ ; x –  $V = 6 \text{ м/мин}$

риной скола  $m_b$  оксидной керамики и средними сечениями среза  $f_3$   
 $m_b(f) = 23 + f_3$  (рис.3).  
 Следовательно, элементарная случайная функция имеет вид

$$B(f_3) = b_c \cdot f_3 + a, \quad (4)$$

где  $b_c$  – случайная величина, распределенная нормально с параметрами  $m_b$ ,  $\sigma_b$ ,  $a$  – неслучайная величина, зависящая от физико-механических свойств обрабатываемой керамики.

В этом случае одномерный закон распределения элементарной случайной функция  $B(f_3)$  нормален и имеет вид [9]

$$f(f_3, b_c) = \frac{1}{\sigma_b(f_3) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b_c - m_b \cdot f_3 - a}{\sigma_b(f_3)}\right)^2\right] \cdot J. \quad (5)$$

Распространение разрушения вглубь керамики при очаговой форме разрушения  $h$  было принято равным половине размера ширины скола, т.е.  $h = 0,5 \cdot b_c$  [3].

Таким образом, для определения условий съема материала припуска на первом этапе необходимо определить вероятность появления скола материала керамики при его срезании алмазным зерном. При наличии скола определяются его размеры. Для моделирования случайной дискретной величины, каковой является число сколов, нами был использован метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [9]. В математической модели, разработанной в работе [10], появление скола моделировалось по закону Пуассона. Глубина резания разбивалась на интервалы до 1 мкм.

Вероятность появления сколов определялась с помощью функции генерации случайных чисел по всем интервалам, сумма высоты которых составляет глубину резания. Эта задача решалась при использовании математического пакета MathCAD на ПЭВМ. Соответствующая функция –  $rnd(x)$ . Таким образом, вероятность появления сколов в  $i$ -том интервале

$$(P_m)_i = rnd(0,1). \quad (6)$$

Для определения количества сколов в  $i$ -том интервале необходимо найти обратное значение (квантили) распределения Пуассона.

$$m_i = \left( P_m^{-1} \right)_i. \quad (7)$$

Используя ранее разработанную математическую модель [9] и представленные выше положения хрупкого разрушения поверхности керамики при алмазном шлифовании, было произведено математическое моделирование процесса формирования шероховатости поверхности. Программа позволяет рассчитать параметры шероховатости в соответствии с ДСТУ ISO 12085-2001: средний шаг неровностей  $A_R$ , среднюю глубину структурных элементов шероховатости  $R$  и максимальную глубину неровностей профиля  $R_x$  в пределах оценочной длины. Кроме этих параметров она позволяет рассчитать средне арифметическое отклонение профиля шероховатости  $R_a$ , высоту сглаживания профиля с высоты наибольшего выступа  $R_p$  и относительную опорную длину профиля  $t_p$ . При моделировании плоского шлифования периферией круга было установлено, что предложенная модель хрупкого разрушения поверхности керамики адекватно отражает реальный механизм образования шероховатости (рис. 4). Все теоретические значения укладываются в доверительный интервал экспериментальных данных.

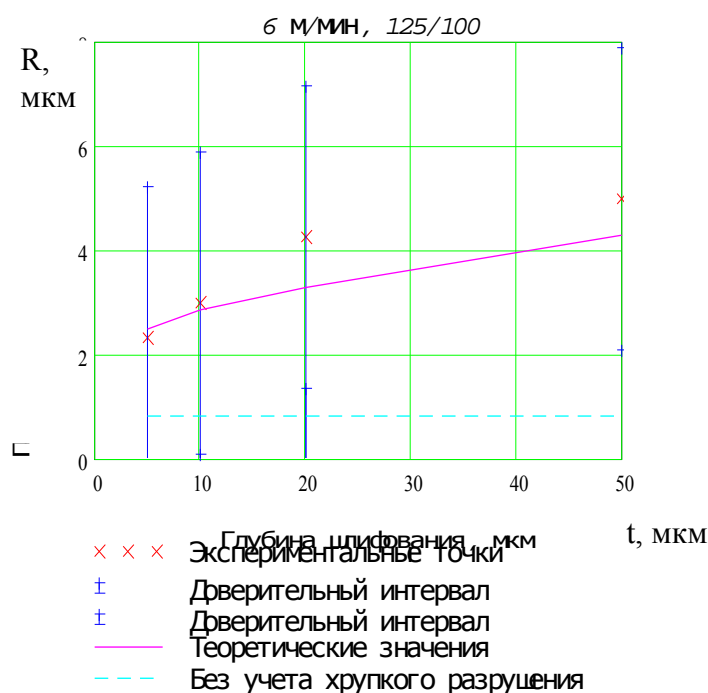


Рис. 4. Влияние глубины шлифования на среднюю глубину структурных элементов шероховатости  $R$  в пределах оценочной длины при плоском шлифовании периферией круга оксидной керамики  $Al_2O_3$ .

Круг 1A1 200x20x32 AC6 125/100 – 4 – M2-01.

прогнозирования всех параметров шероховатости обработанной поверхности керамических изделий при алмазном шлифовании. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении автором видится в создании обобщенной модели формирования шероховатости хрупких материалов, обрабатываемых с помощью алмазного шлифования.

Для определения адекватности модели формирования параметров шероховатости поверхностного слоя с учетом хрупкого разрушения припуска в виде сколов было произведено моделирование рассматриваемого процесса при сечении срезов, повторяющих форму зерна. Полученные значения параметра шероховатости  $R$  показывают, что расхождения в этом случае с экспериментальными данными весьма существенны и могут достигать 500 %.

Таким образом, представленная модель хрупкого разрушения поверхности керамики при алмазном шлифовании адекватно отражает реальный механизм формирования шероховатости. Данная модель реализована в универсальной математической системе расчетов MathCAD и может быть использована для

**Список литературы:** 1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 2. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. – М., 1975. – 343 с. 3. Технологическое обеспечение качества изготовления деталей с износостойким покрытием/ Ю.К. Новоселов, С.П. Кулагин, С.Л. Леонов, Е.Ю. Татаркин. – Новосибирск: изд-во Новосибирского ун-та, 1993. – 205 с. 4. Молчанов А.Д. Формирование поверхностного слоя изделий из оксидной керамики при алмазном шлифовании. Диссертация кандидата технических наук: 05.03.01. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – 224 с. 5. Voccaccini A.R. The Relationship between Wear Behaviour and Brittleness Index in Engineering Ceramics and Dispersion-Reinforced Ceramic Composites //Interceram. – 1999. – Vol. 48, No. 3. – P. 176 – 187. 6. Гусев В.В. Влияние на качество поверхностного слоя технической керамики износа алмазного шлифовального круга// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Випуск №12. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 234-241. 7. Амбарцумян Р.В., Мекке Й., Штойян Д. Введение в стохастическую геометрию – М.: Наука, 1989. – 400 с. 8. Гусев В.В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 65. – С. 37-46. 9. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с. 10. Гусев В.В., Молчанов А.Д. Математическая модель формирования шероховатости поверхности конструкционной керамики при алмазном шлифовании // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Межд. сб. науч. трудов. Вып. 19. – Донецк: ДонГТУ, 2002. – С. 50-57.

**ВЛИЯНИЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПРИПУСКА КЕРАМИКИ  
НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ  
ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

Гусев В.В.

В статье рассмотрены физические основы формирования шероховатости поверхностного слоя деталей из керамики. Это позволило разработать математическую модель расчета параметров шероховатости керамики с учетом вероятностного характера хрупкого разрушения припуска в виде сколов.

**ВПЛИВ КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ПРИПУСКУ КЕРАМІКИ  
НА ФОРМУВАННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ  
ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ**

Гусев В.В.

У статті розглянуті фізичні основи формування шорсткості поверхневого шару деталей з кераміки. Це дозволило розробити математичну модель розрахунку параметрів шорсткості кераміки з урахуванням ймовірностного характеру крихкого руйнування припуску у вигляді сколів.

**INFLUENCE OF THE BRITTLE FRACTURE ON THE SURFACE MICRORELIEF  
FORMING UNDER THE CERAMIC DIAMOND GRINDING**

Gusev V. V.

The basic physics of forming of the ceramic components surface layer roughness are examined in the paper. This made it possible to develop the mathematical model of calculation of the ceramic roughness parameters with taking into account the random nature of the tolerance by way of cleavages.